

Modélisation numérique de la houle dans le port de Banyuls

Philippe HELLUY, Vincent REY
Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var

1998

1 Introduction

Le port de Banyuls a été construit il y a plus de 30 ans. Sa conception présente certains défauts que la Mairie souhaite aujourd'hui corriger :

- Dans certaines conditions de vent la houle pénètre dans le port et rend la première moitié de celui-ci inutilisable (zone (A)).
- De plus, un probable phénomène de résonance provoque dans la zone (B) une amplitude de vague importante (voir figure 1). Les bateaux risquent de se détériorer sur les pontons fixes.

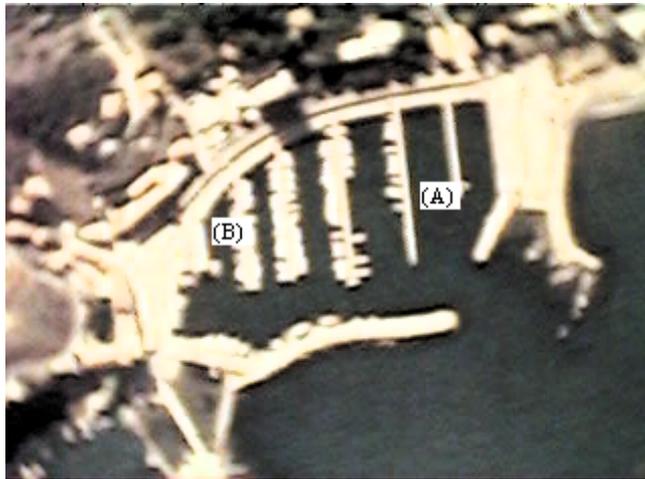


Figure 1: *Vue aérienne du port de Banyuls*

Le but de l'étude proposée ici est dans un premier temps de construire un modèle physique et numérique du port permettant de reproduire et d'expliquer les phénomènes observés.

Cette modélisation permettra, dans un second temps, d'étudier l'impact de deux ou trois modifications de la géométrie du port sur ces phénomènes.

2 Modèle physique

2.1 Equations en eau peu profonde

Dans ce paragraphe, nous commençons par établir les équations mathématiques qui seront résolues dans la partie suivante.

Les équations générales de Navier-Stokes sont les équations auxquelles obéissent la plupart des fluides, dont l'eau. Cependant, il est irréaliste de vouloir les résoudre, même numériquement, de façon précise dans un contexte portuaire. Aucun ordinateur n'est capable à ce jour de traiter une telle quantité d'information!

Heureusement, dans le cas de mouvements faibles, c'est à dire, en gros, quand les vagues ne déferlent pas, de nombreuses simplifications sont possibles et justifiées par l'expérience:

- La viscosité de l'eau peut être négligée.
- L'eau peut être considérée comme un fluide incompressible.
- Les variations de la vitesse du fluide suivant la verticale peuvent être négligées.
- La pression peut être assimilée à la pression hydrostatique.

Ces hypothèses conduisent, en moyennant les équations de Navier-Stokes sur la verticale, au modèle dit d'**eau peu profonde**. Ce modèle est très utile lorsqu'on s'intéresse plus particulièrement aux mouvements de la surface de l'eau. En effet, l'inconnue principale devient une fonction $h(t, x, y)$ qui représente, à l'instant t , et au point de coordonnées (x, y) , la variation de la hauteur d'eau par rapport à la hauteur d'eau moyenne $H_0(x, y)$.

En définissant la hauteur d'eau totale par $H = H_0 + h$, et en introduisant le vecteur vitesse horizontale $u(t, x, y)$, le modèle d'eau peu profonde s'écrit

$$\begin{aligned}\partial_t H + \operatorname{div}(Hu) &= 0 \\ \partial_t Hu + \operatorname{div}(Hu \otimes u) + gH\nabla h &= 0\end{aligned}$$

où $g = 9,81\text{m/s}^2$ désigne l'accélération de la pesanteur. Ces équations sont établies rigoureusement dans le traité de physique de Landau [1]. Pour une présentation plus détaillée, voir aussi la thèse de Santos [5].

2.2 Linéarisation des équations

Dans le cas de vagues de faibles amplitudes, une linéarisation des équations peut être réalisée.

Si l'on suppose que h est petit devant H_0 , et que l'on peut négliger les termes quadratiques en u , on obtient les équations linéarisées

$$\begin{aligned}\partial_t h + \operatorname{div}(H_0 u) &= 0 \\ \partial_t H_0 u + g H_0 \nabla h &= 0\end{aligned}$$

En dérivant la première équation par rapport au temps, et en prenant la divergence de la seconde équation, ce système conduit à l'équation des ondes

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} - \operatorname{div}(g H_0 \nabla h) = 0 \quad (1)$$

2.3 Houle incidente

Par temps calme, la solution de l'équation des ondes est tout simplement $h = 0$! Ce sont les oscillations de la surface de l'eau venant du large qui vont provoquer une agitation dans le port. Il est donc indispensable de connaître les caractéristiques des ondes venant du large, avant de pouvoir réaliser un calcul dans le port.

En première approximation, la houle venant de la haute mer (appelée houle ou **onde incidente**, et notée h_{inc}) peut souvent être considérée comme une onde plane sinusoïdale d'amplitude complexe¹ A , de pulsation ω et de vecteur d'onde k :

$$h_{\text{inc}}(t, X) = A \exp [i(k \cdot X - \omega t)] \text{ avec } k = (k_x, k_y) \text{ et } X = (x, y)$$

La houle incidente doit bien sûr satisfaire à l'équation des ondes (1). Ceci conduit à la très importante relation

$$|k| = \frac{\omega}{\sqrt{g H_0}}$$

Par ailleurs, à la pulsation ω est associée une période de houle $T = \frac{2\pi}{\omega}$. T est le temps qui sépare l'arrivée de deux crêtes successives de vague. On est ainsi conduit à définir la célérité c , la longueur d'onde λ , et la fréquence f de la houle incidente

$$\begin{aligned}c &= \sqrt{g H_0} \\ \lambda &= cT \\ f &= 1/T\end{aligned}$$

En pratique, la période et la direction du vecteur d'onde de la houle incidente dépendent essentiellement de la force et de la direction du vent. Ce sont donc pour nous des données expérimentales. La période de houle peut varier entre 6 et 12 secondes.

Il faut savoir que ce modèle de houle incidente purement sinusoïdale n'est qu'une approximation. Il conduit, en général, à une surestimation de l'amplitude des vagues dans le port.

¹L'introduction de quantités complexes n'est qu'une astuce pour simplifier les calculs. L'onde physique s'obtient en prenant la partie réelle de l'onde complexe.

Ce modèle peut être amélioré en exprimant que la houle incidente est en fait une superposition d'ondes planes sinusoïdales de pulsations ω . L'amplitude de la houle suivant chaque pulsation est caractérisée par une fonction $S(\omega)$ appelée spectre de houle. Ce spectre peut être déterminé expérimentalement et permet de prendre en compte des phénomènes aléatoires, ou non linéaires (excitation de modes sous-harmoniques). Il dépend de la force du vent, mais aussi de la géométrie de la côte près du port.

Dans le cadre de cette étude, nous nous contenterons du modèle de houle purement sinusoïdale.

Si l'on s'intéresse à une pulsation particulière, on peut alors écrire

$$\begin{aligned} h(t, x, y) &= e^{-i\omega t} h(x, y) \\ u(t, x, y) &= e^{-i\omega t} u(x, y) \end{aligned}$$

soit

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}(gH_0\nabla h) - \omega^2 h &= 0 \\ u &= i\frac{g}{\omega}\nabla h \end{aligned} \tag{2}$$

En pratique, h sera calculé pour diverses pulsations. Ces calculs permettent de connaître la réponse du port à chaque fréquence de houle, et éventuellement de simuler un comportement plus réaliste, si le spectre de houle est connu.

2.4 A propos des pontons...

Les darses du port sont séparés par des pontons fixes en bétons. Du fait de leur faible épaisseur (de l'ordre du mètre), nous avons considéré qu'ils n'empêchaient que très peu l'eau de passer dessous. C'est la raison pour laquelle ils ne sont pas pris en compte dans notre modélisation. Il est probable que leur rôle est bénéfique dans l'atténuation de la houle. Il s'agit donc d'une hypothèse pessimiste.

L'effet des bateaux sera lui aussi négligé !

2.5 Conditions aux limites

Aux équations (2), valables à l'intérieur du port, doivent être adjointes des conditions aux limites qui permettent de prendre en compte les effets des digues et des quais, ainsi que de la houle incidente.

Près d'un quai vertical, ces conditions sont faciles à écrire. Il suffit de traduire mathématiquement le fait que l'eau ne rentre pas dans le quai. Si l'on note ν le vecteur normal au quai, dirigé de l'intérieur du port vers la terre, on doit avoir

$$u \cdot \nu = 0$$

soit encore

$$\frac{\partial h}{\partial \nu} := \nabla h \cdot \nu = 0$$

Près d'une digue ou d'une plage, les choses sont nettement plus compliquées. En effet, une vague qui arrive sur un pan incliné finit par déferler, et le déferlement est un phénomène fortement non linéaire qui n'est pas pris en compte par le modèle (2). L'approche suivante est alors utilisée, pour prendre en compte de façon approximative la dissipation d'énergie dûe aux digues:

Supposons qu'une onde plane arrive sur un morceau de digue. On peut considérer qu'une partie de cette onde va être absorbée par la digue, tandis qu'une autre partie va être renvoyée suivant les lois de l'optique géométrique. Notons h_0 l'onde incidente et h_r l'onde réfléchie:

$$h_0 = Ae^{ik \cdot X}$$

où $X = (x, y)$ et $k = (k_x, k_y)$. En injectant dans l'équation (2), on voit que nécessairement

$$k_0 = |k| = \frac{\omega}{\sqrt{gH_0}}$$

L'onde réfléchie s'écrit donc

$$h_r = A r e^{ik' \cdot X}$$

où $k' = k - 2\left(\frac{k}{|k|} \cdot \nu\right)k$ est le vecteur d'onde de l'onde réfléchie, et r est le coefficient de réflexion, $0 \leq r \leq 1$. L'onde complète s'écrit donc

$$h = Ae^{ik \cdot X} + A r e^{ik' \cdot X}$$

et

$$\nabla h \cdot \nu = A \left(ik \cdot \nu e^{ik \cdot X} + r ik' \cdot \nu e^{ik' \cdot X} \right)$$

Dans le cas particulier où l'incidence de l'onde est presque perpendiculaire (c'est à dire $\frac{k}{|k|} \simeq \nu$), on a, près de la digue (voir figure 2):

$$\frac{\partial h}{\partial \nu} = ik_0 \frac{1-r}{1+r} h \tag{3}$$

C'est cette condition aux limites qui sera utilisée dans le modèle.

Dans notre simulation, nous prendrons $r = 1$ sur un quai vertical (réflexion parfaite), $r = 0,4$ sur une plage, et $r = 0,6$ sur une digue (pour une étude expérimentale de ces coefficients de réflexion, voir [3]). Nous serons aussi amenés à essayer $r = 0$ sur les digues subissant un déferlement.

Enfin, il existe un dernier type de frontière, appelée **frontière artificielle**. Cette frontière doit être ajoutée afin de limiter le domaine où l'on réalise les calculs (il n'est pas question de calculer la houle dans toute la Méditerranée !). C'est sur cette frontière que vont être utilisées les informations concernant la houle incidente.

A cette fin, on définit la houle diffractée par

$$h_d = h - h_{\text{inc}}$$

Cette quantité mesure de combien la houle incidente est perturbée par la présence du port. Loin du port, cette quantité doit être faible. En pratique, on exprime que l'onde

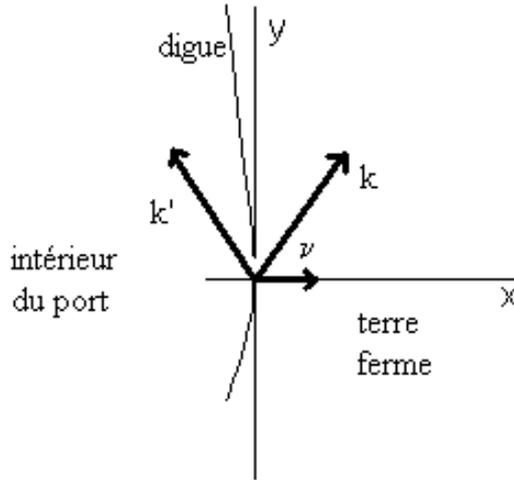


Figure 2: Réflexion d'une onde plane sur une digue

diffRACTÉE est transmise à travers la frontière artificielle selon la condition (3), avec un coefficient de réflexion $r = 0$. Ceci conduit à

$$\frac{\partial h}{\partial \nu} - ik_0 h = \frac{\partial h_{\text{inc}}}{\partial \nu} - ik_0 h_{\text{inc}} \quad (4)$$

La définition des divers types de frontière est résumée sur la figure 3.

3 Modèle numérique

Nous sommes maintenant en mesure d'écrire précisément l'ensemble des équations vérifiées par la houle dans le port.

On note Ω la réunion de la partie mouillée du port et de la zone extérieure au port délimitée par la frontière artificielle. On note Γ_∞ cette frontière artificielle. On note Γ l'ensemble des digues et des quais.

La houle arrivant du large est supposée connue, de période T , et de la forme

$$h_{\text{inc}} = e^{ik \cdot X}$$

où k est le vecteur d'onde, $k_0 = \frac{\omega}{\sqrt{gH_0}}$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, et $X = (x, y)$ est la position d'un point à la surface de l'eau.

Il s'agit alors de trouver une fonction $h(x, y)$, définie dans Ω , solution de

$$-\text{div}(gH_0 \nabla h) - \omega^2 h = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \nu} = ik_0 h + \frac{\partial h_{\text{inc}}}{\partial \nu} - ik_0 h_{\text{inc}} \text{ sur } \Gamma_\infty \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \nu} = ik_0 \frac{1-r}{1+r} h \text{ sur } \Gamma \quad (7)$$

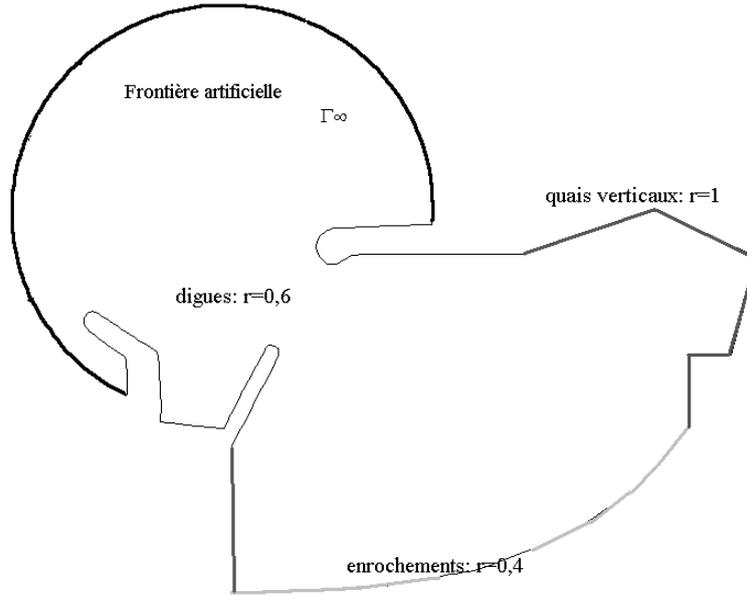


Figure 3: *Types de frontières et coefficients de réflexion associés*

Cet ensemble d'équations constitue mathématiquement un problème aux limites, c'est à dire la donnée d'une équation aux dérivées partielles (5), et de conditions aux limites (6), (7). On peut montrer qu'il est "bien posé": les informations données pour le résoudre sont suffisantes, sans être surabondantes.

3.1 Méthode des éléments finis

Malgré toutes les simplifications réalisées jusqu'ici, qui ont conduit au système (5), (6), (7), le calcul de la solution de ce système est impossible à la main. Nous allons donc utiliser une technique de calcul numérique de cette solution par ordinateur.

La première étape de ce calcul consiste à réaliser un **maillage** du port, c'est à dire un découpage de celui-ci en petits rectangles, appelés **éléments finis** (voir figure 4).

Nous chercherons ensuite à calculer la fonction h sur chaque élément, en des points précis: son milieu, ses 4 sommets et les milieux des 4 arêtes (soit 9 inconnues sur chaque élément). Ces 9 points, où la fonction h doit être évaluée, sont appelés les **noeuds** de l'élément.

Un paramètre important est la finesse du maillage. Plus la taille des éléments est petite, et plus le nombre N de noeuds du maillage est grand, plus le calcul sera précis. En pratique, il est recommandé de ne pas mettre moins de 2 éléments dans une longueur d'onde de houle incidente. Rappelons que la longueur d'onde s'écrit

$$\lambda = T\sqrt{gH_0}$$

Pour $H_0 = 2\text{m}$, $T = 6\text{s}$, on trouve $\lambda \simeq 25\text{m}$ (cas le plus défavorable).

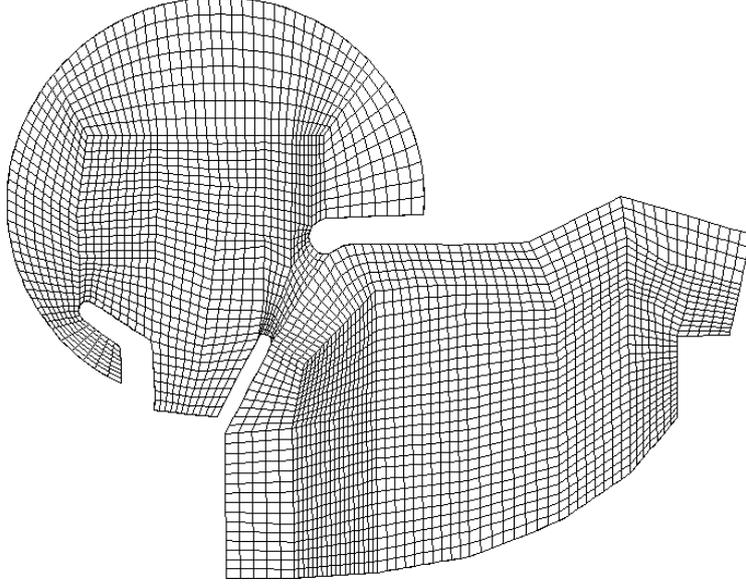


Figure 4: *Maillage du port*

Pour calculer h en chaque noeud du maillage, on associe à chaque noeud N_i une fonction continue $\varphi_i(X)$ qui vaut 1 en ce noeud et 0 sur les autres noeuds. Si l'on pose

$$h(X) \simeq \sum_{j=1}^N h_j \varphi_j(X)$$

on doit avoir, pour tout $i = 1 \dots N$

$$(-\operatorname{div}(gH_0 \nabla h) - \omega^2 h) \varphi_i = 0$$

soit, en intégrant sur Ω , et en utilisant la formule de Green

$$\int_{\Omega} gH_0 \nabla h \cdot \nabla \varphi_i - \omega^2 h \varphi_i - \int_{\partial\Omega} gH_0 \frac{\partial h}{\partial \nu} \varphi_i = 0$$

on remplace alors $\frac{\partial h}{\partial \nu}$ en utilisant les conditions aux limites, ce qui conduit à

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} gH_0 \nabla h \cdot \nabla \varphi_i - \omega^2 h \varphi_i \\ & - \int_{\Gamma} gH_0 i k \frac{1-r}{1+r} h \varphi_i \\ - \int_{\Gamma_{\infty}} gH_0 i k h \varphi_i & = \int_{\Gamma_{\infty}} gH_0 \left(\frac{\partial h_{\text{inc}}}{\partial \nu} - i k h_{\text{inc}} \right) \varphi_i \end{aligned}$$

on est ainsi amené à la résolution d'un système linéaire

$$KU = S \tag{8}$$

où U est le vecteur des valeurs de h aux noeuds N_i

$$U_i = h_i$$

et où les composantes de la matrices K et du vecteur S sont données par

$$\begin{aligned} K_{i,j} = & \int_{\Omega} gH_0 \nabla \varphi_j \cdot \nabla \varphi_i - \omega^2 \varphi_j \varphi_i \\ & - \int_{\Gamma} gH_0 ik \frac{1-r}{1+r} \varphi_j \varphi_i \\ & - \int_{\Gamma_{\infty}} gH_0 ik \varphi_j \varphi_i \end{aligned}$$

et

$$S_i = \int_{\Gamma_{\infty}} gH_0 \left(\frac{\partial h_{\text{inc}}}{\partial \nu} - ik h_{\text{inc}} \right) \varphi_i$$

Ce système linéaire est résolu numériquement, en utilisant le fait que de nombreux termes de la matrice K sont nuls, et peuvent ne pas être stockés dans la mémoire de l'ordinateur pour économiser celle-ci.

3.2 Réalisation informatique

- Un programme de calcul de la matrice K et du second membre S a été écrit en C++ . Ce programme permet aussi de résoudre le système linéaire (8) et de représenter les résultats obtenus graphiquement.
- Un maillage du port a été réalisé. Voir figure 4. Il comporte environ 13000 noeuds: le système (8) est donc un système de 13000 équations à 13000 inconnues.

Il a ensuite fallu numériser la bathymétrie du port, c'est à dire donner en chaque noeud du maillage la profondeur H_0 . Les courbes de niveau sont représentées en couleurs sur la figure 5. Le rouge correspond à la profondeur minimale (de l'ordre de 1m50) et le noir à la profondeur maximale (de l'ordre de 9m). Les autres couleurs correspondent à des profondeurs intermédiaires.

- On s'est ensuite donnée une direction de houle correspondant aux vents dominants nord-sud (approximativement), soit une direction perpendiculaire à la digue nord-est. Dans notre repère, cela correspond à un vecteur $k = (0, -k_0)$. On suppose que l'amplitude de la houle entrante est égale à 1m.
- Pour une période de houle T donnée, il est alors possible de calculer la hauteur d'eau complexe $h(x, y)$ en tous les noeuds du maillage. Cette hauteur d'eau doit être multipliée par la véritable amplitude de la houle en entrée pour obtenir une valeur physique. Pour cette raison, la hauteur calculée est souvent appelée **coefficient d'amplification**.

Pour une période T , ce calcul dure environ 1 min 30 s sur un PC Pentium II à 233 Mhz, avec 64 Mo de mémoire vive, sous le système d'exploitation Linux.

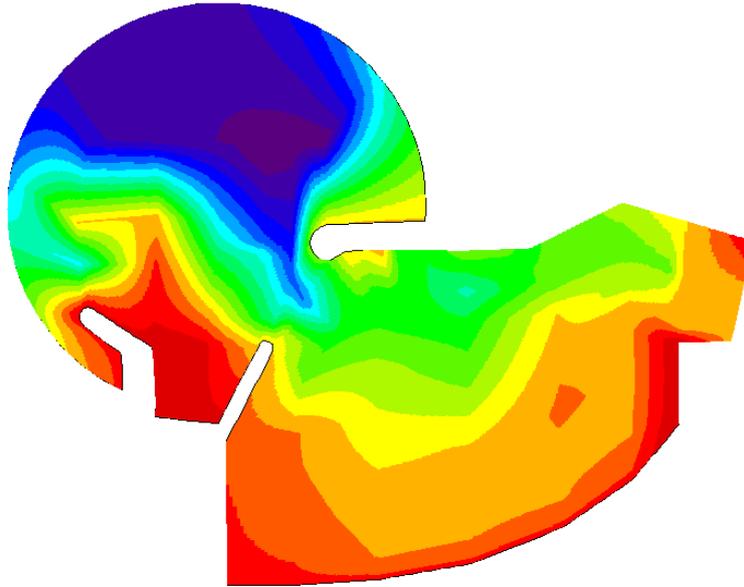


Figure 5: *Bathymétrie (rouge=1,2 m ; violet=9m)*

- Connaissant h , il est alors possible de visualiser la variation de la hauteur d'eau à un instant donné. Pour cela, on trace les courbes de niveau de la fonction $\text{Re}(h(x, y) \cdot \exp(-i\omega t))$, à t fixé. On obtient une image des vagues à un instant donné (avec les creux et des bosses). Le rouge correspond aux bosses (au dessus du niveau de l'eau par temps calme), et le noir aux creux (sous le niveau moyen de l'eau). En effectuant plusieurs tracés, pour des instants successifs, il est aussi possible de réaliser une animation.

Sur la figure 6, on a représenté les résultats d'un tel calcul, pour une période de houle T de 7 secondes (à $t = 0$). Le rouge correspond à une bosse supérieure à 0.7m, et le violet à un creux inférieur à -0.7m (pour une houle en entrée de 1m).

- Il est aussi possible de tracer le module de la fonction complexe h . On obtient ainsi, en chaque point du port, l'amplitude maximale des oscillations de la surface de l'eau. Cette amplitude A est toujours positive. Au cours du temps, la surface de l'eau oscillera entre la position $H_0 - A$ et la position $H_0 + A$.

Une telle image est donnée figure 7, pour $T = 7s$. Le rouge correspond à des zones de forte agitation (supérieure à 4m50) , et le violet à des zones où l'agitation est très faible.

Le même résultat est représenté figure 8, avec une autre échelle, pour mieux voir ce qui se passe dans le port (le rouge correspond à une amplitude supérieure à 1m).

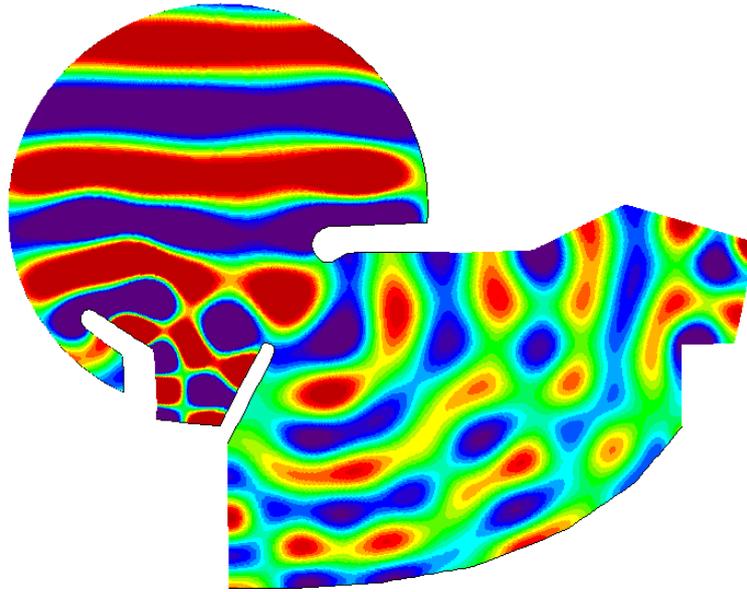


Figure 6: *Visualisation des vagues*

3.3 Comment interpréter les résultats?

Comme nous l'avons déjà dit ci-dessus, la houle à l'entrée du port n'est pas une sinusoïde pure, mais plutôt une superposition de sinusoïdes de périodes différentes. Pour cette raison, l'amplitude $A(T)$ calculée peut être exagérée en certains points du port, comparée aux amplitudes réellement mesurées.

D'autre part, le modèle ne prend pas en compte les effets de dissipation non linéaire, comme le déferlement. Dans le cas d'une forte amplitude de houle incidente, il y a là aussi surestimation du coefficient d'amplification. Une prise en compte partielle des effets non-linéaires sera décrite ci-dessous.

Les résultats sont néanmoins intéressants, car ils montrent comment certaines fréquences sont amplifiées par le port, et quelles périodes de houle sont critiques pour celui-ci.

4 Résultats numériques

4.1 Zones caractéristiques

Au cours de nos expériences numériques, nous avons pu mettre en évidence divers phénomènes. Ces phénomènes sont particulièrement significatifs dans certaines zones du port. Plutôt que de noyer le lecteur sous un déluge de résultats, nous avons préféré adopter une approche plus synthétique, en ne donnant que les résultats relatifs à ces zones.

Comme c'est l'usage à Banyuls nous repérons les quais et les pontons par des lettres de A (quai ouest) à G (quai de l'ancienne cale de halage). Nous avons alors choisi de nous intéresser à quatre zones:

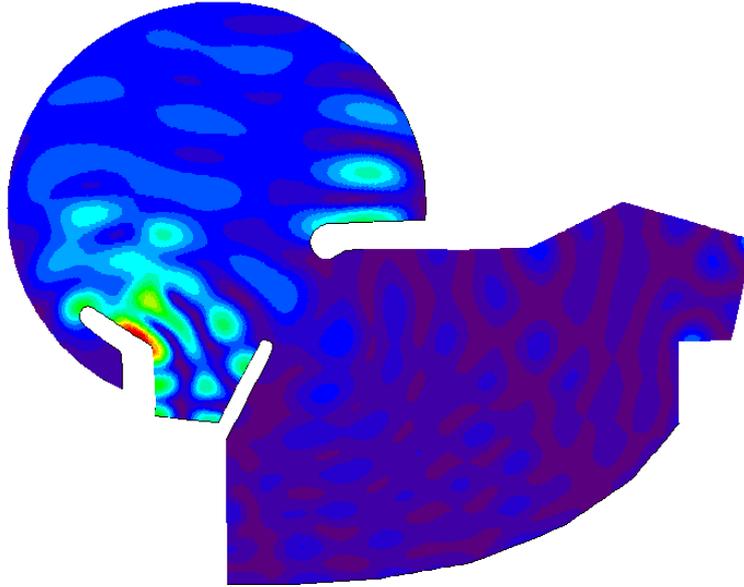


Figure 7: *Coefficient d'amplification (rouge: 4,5 m ; violet: 0 m)*

- La passe d'entrée du port.
- La darse près du quai du Laboratoire (que nous appelons le "bassin").
- La darse comprise entre les pontons B et C (darse B-C)
- La darse près de l'ancienne cale (darse F-G).

Voir figure 9. Dans la suite du rapport ces **zones caractéristiques** seront respectivement dénommées "**darse B-C**", "**darse F-G**", "**passe**" et "**bassin**". Nous espérons que cette terminologie n'est pas trop malheureuse. Dans tous les cas, il est fortement recommandé de se référer à la figure 9!

4.2 Méthodologie

Afin de mesurer l'impact d'une modification du port, nous avons alors procédé de la façon suivante:

- Sur la **géométrie actuelle**, nous avons d'abord calculé la fonction h pour les périodes $T_1 = 6s$, $T_2 = 6,5s$, $T_3 = 7s$, \dots , $T_{13} = 12s$. Nous obtenons ainsi, pour chaque zone, des amplitudes **moyennes** A_k correspondant à ces fréquences de houle.
- Le même calcul est réalisé sur un **port modifié**.
- On regarde si les amplitudes ont diminué

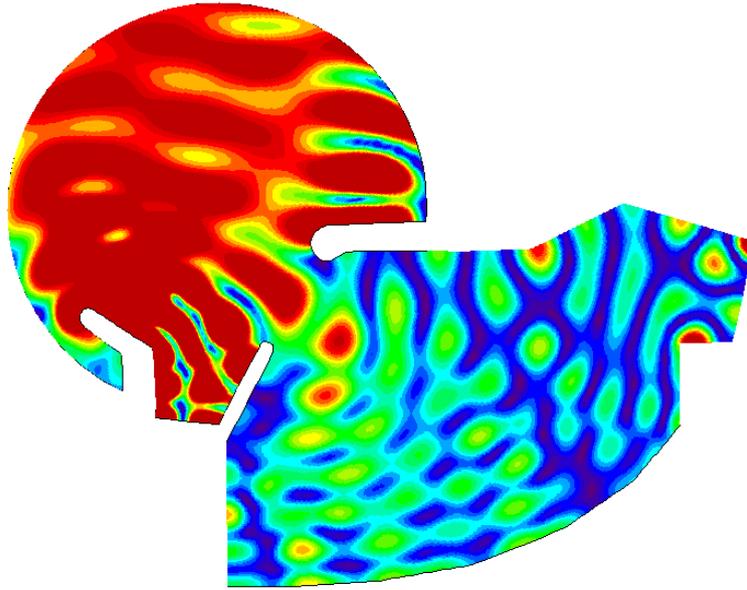


Figure 8: *Coefficient d'amplification (rouge: 1 ; violet: 0)*

Cette approche est cohérente car les méthodes employées pour la simulation de la houle sur le port actuel et les nouvelles configurations sont strictement identiques.

4.3 Configuration actuelle du port

4.3.1 Balayage en fréquence

Sur la figure 10 sont représentées les variations du coefficient d'amplification, dans chaque zone caractéristique, et dans la configuration **actuelle** du port.

4.3.2 Interprétation

On constate sur la figure 10 que le coefficient d'amplification subit à peu près les mêmes variations dans la darse F-G, le bassin et la passe, tandis qu'il présente un comportement différent dans la darse B-C.

On retrouve ce qui était prévisible physiquement, et observé sur la cassette vidéo fournie par la Mairie:

- On observe d'abord, et ce phénomène est particulièrement flagrant sur la figure 11, que la houle **diffracte** à l'entrée du port: l'onde plane, en passant dans l'ouverture du port, se transforme en une onde de type sphérique qui vient balayer toutes les darses.
- Dans la première moitié Nord-Ouest du port (darse B-C) le comportement des ondes est plutôt de type propagatif: la houle pénètre dans cette partie du port

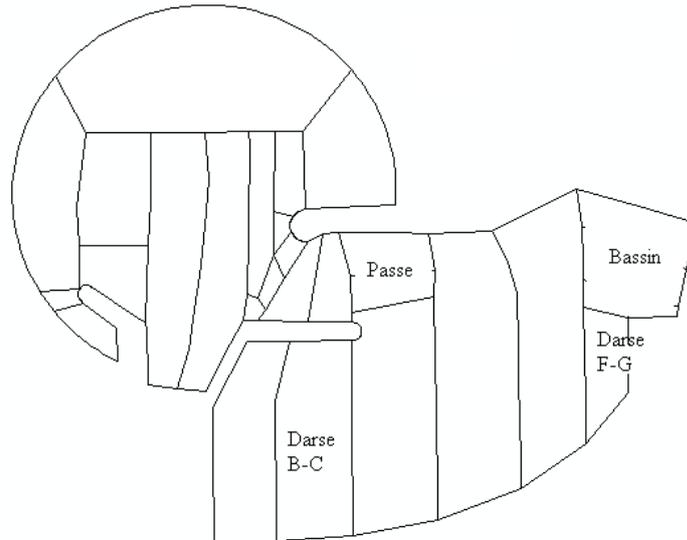


Figure 9: *Zones caractéristiques du port*

sans rencontrer de digue et vient s'atténuer sur les enrochements le long de la route nationale.

- Un phénomène de résonance et d'onde stationnaire (seiche) apparaît clairement dans la seconde moitié (Sud-Est). En arrivant dans cette partie du port, la houle est réfléchiée sur les quais verticaux. A certaines fréquences la houle réfléchiée vient s'ajouter à la houle entrante (résonance). A d'autres fréquences, on observe le phénomène inverse (atténuation).

Le calcul numérique permet de mettre en évidence deux fréquences de résonance, qui correspondent environ à $T_1 = 7,5$ s et $T_2 = 11$ s. L'étude physique réalisée par les étudiants de l'ISITV à l'aide de la cassette vidéo a aussi mis en évidence l'importance de la période $T = 11$ s (voir page 15 de l'étude physique). On observe également deux fréquences de forte atténuation à 6,5 et 9 s. Il est important de dire ici que ces **phénomènes d'atténuation peuvent difficilement être exploités dans la conception d'un port**. Il sont en effet d'une part sensibles à la période de houle. D'autre part, il est très difficile d'avoir atténuation à une fréquence sans en contrepartie créer une résonance à une autre fréquence. Il est beaucoup plus important pour la sécurité d'un port d'essayer de **supprimer les pics** des courbes de coefficients d'amplification plutôt que d'en exploiter les creux.

Nous pouvons conclure que le modèle numérique reproduit correctement les phénomènes réels. Une comparaison plus précise, à l'aide de mesures in situ, aurait été intéressante, mais n'a pas été réalisée.

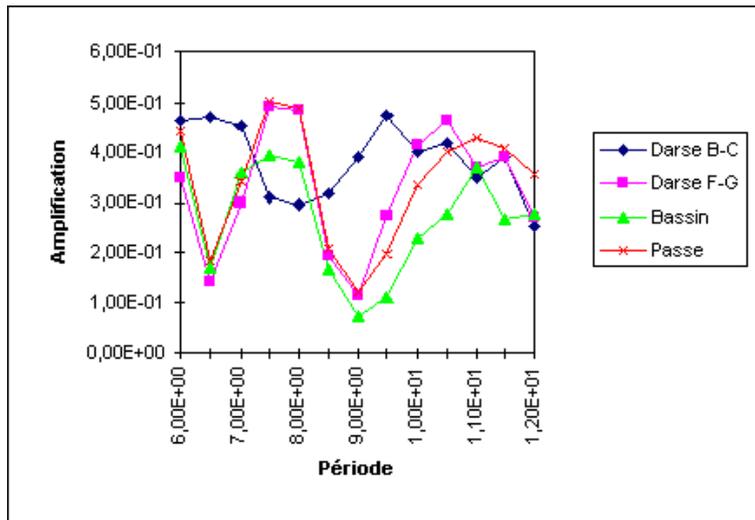


Figure 10: Coefficient d'amplification moyen (géométrie actuelle)

4.4 Prise en compte partielle du déferlement

4.4.1 Balayage en fréquence

Sur la figure 12 on a représenté les résultat d'un calcul avec prise en compte partielle du déferlement. Pour cette simulation, le coefficient de réflexion a été fixé à zéro sur les digues où les vagues déferlent.

4.4.2 Interprétation

Ce calcul permet de simuler la diminution du coefficient d'amplification et de ses variations quand les vagues déferlent (effet non-linéaire). Le surplus d'énergie est absorbé dans ce cas par les digues qui subissent le déferlement.

On observe sur la figure 12 une diminution générale du coefficient d'amplification, ainsi qu'une suppression des pics de résonance et des creux d'atténuation. Soumis à une grande amplitude incidente, le port réagit de façon à peu près uniforme à toutes les fréquences.

Pour la suite de l'étude nous nous placerons dans le cas où il n'y a pas de déferlement des vagues. Cette hypothèse revient à surestimer le coefficient d'amplification

4.5 Propositions de modification

Les solutions étudiées pour diminuer l'agitation dans le port sont aux nombres de trois

- La première amélioration consiste à reconstruire une cale de halage sur le quai donnant accès à la darse FG. En effet, le déferlement des vagues sur le plan incliné, conduit à une atténuation de la houle dans cette zone. Dans notre modèle, nous

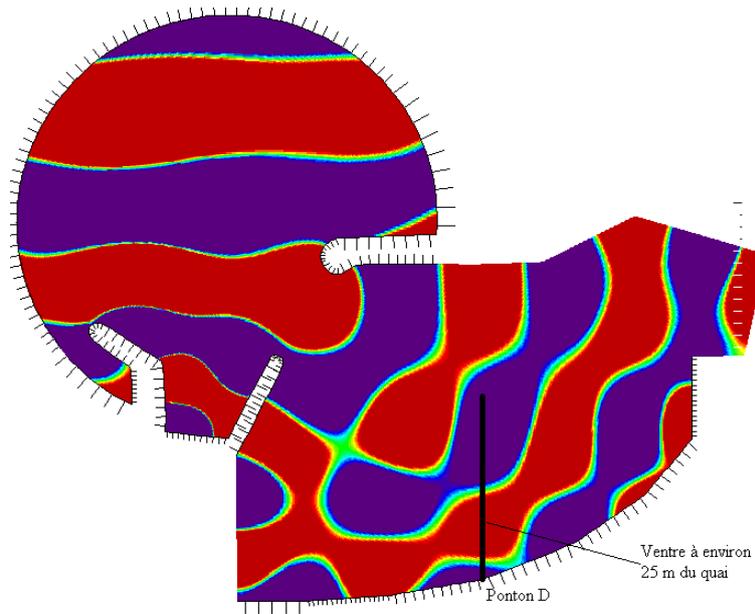


Figure 11: *Diffraction de la houle ($T = 11 s$).*

avons considéré que cela revenait à mettre un coefficient de réflexion $r = 0,6$ sur le quai voisin de la darse FG.

- La deuxième amélioration imaginée est de prolonger le quai Nord-Ouest par une digue parallèle à la digue Nord-Est. Voir figure 9.
- La troisième amélioration envisagée consiste en un allongement de la digue Nord-Est d'environ 50 mètres. Cette modification de géométrie est représentée figure 13.

Cette construction, nécessite de déplacer l'entrée du port vers l'ouest, vers une zone de bas fonds et de récifs. Il est donc indispensable de creuser à cet endroit. Nous avons fait l'hypothèse d'une profondeur d'au moins trois mètres. La nouvelle bathymétrie est représentée figure 13.

4.5.1 Ajout de la cale de halage

Le coefficient d'amplification dans les zones caractéristiques est tracé figure 14. On constate que seul le coefficient d'amplification dans la darse F-G bénéficie d'une amélioration. Les autres courbes sont quasiment inchangées (comparer avec la figure 10).

L'ajout de la cale a donc une influence bénéfique sur l'agitation dans la darse FG. L'effet sur le reste du port est négligeable. Les deux simulations qui suivent ont donc été réalisées **sans la prise en compte de la cale de halage**.

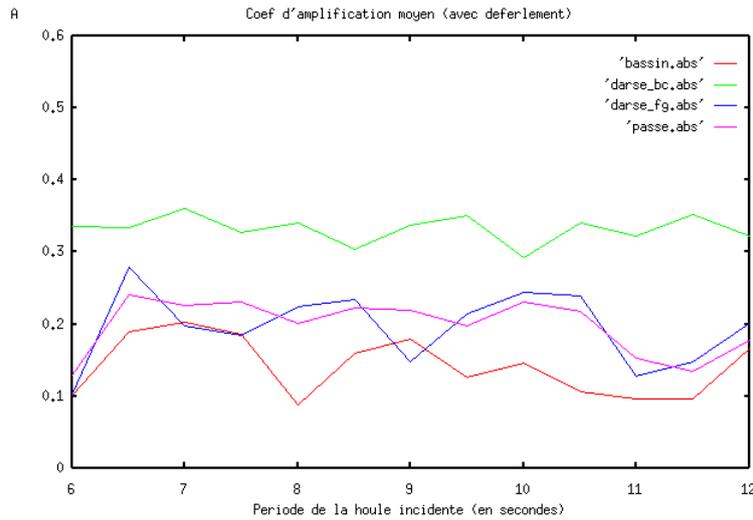


Figure 12: *Coefficient d'amplification moyen avec déferlement (géométrie actuelle)*

4.5.2 Ajout de la première digue

On a comparé sur les figures 15, 16, 17, 18 les coefficients d'amplification avant et après l'ajout de la première digue, dans les zones caractéristiques. Voir aussi les figures 19 et 20.

On constate une nette amélioration dans la darse B-C, ainsi que dans la zone du port protégée par la nouvelle digue. La modification a donc un effet bénéfique sur les phénomènes propagatifs. Cet effet est particulièrement clair quand on compare les figures 19 et 20.

Le phénomène de résonance qui apparaît dans le reste du port n'est pas modifié. Il n'est cependant pas amplifié.

Deux aspects doivent ici être considérés:

- le fait d'ajouter la première digue revient à réduire l'entrée du port. L'évacuation de l'énergie diffractée se fait donc moins bien, ce qui a tendance à augmenter le phénomène de résonance. On constate aussi que la digue a tendance à canaliser la houle vers le "bassin" et la "darse F-G", précisément là où a lieu le phénomène d'onde stationnaire.
- l'absorption sur la digue vient contrebalancer l'effet précédent. Globalement les deux effets s'équilibrent.

4.5.3 Ajout des deux digues

On a comparé sur les figures 15, 16, 17, 18 les coefficients d'amplification avant et après l'ajout des **deux digues**, dans les zones caractéristiques. Voir aussi les figures 19 et 21.

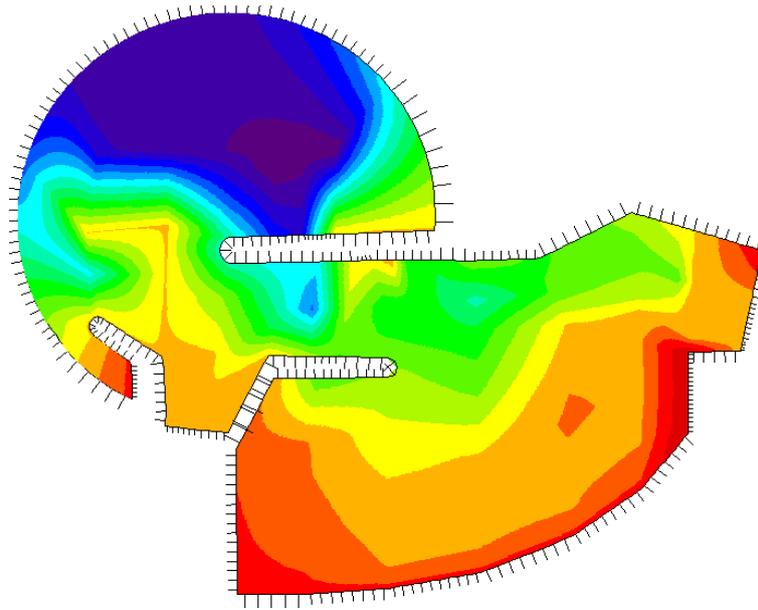


Figure 13: *Nouvelle Bathymétrie (rouge=1,2 m ; violet=9 m ; orange=3m)*

En plus des effets précédemment décrits, on constate une forte diminution du phénomène de résonance observé aux alentours de $T = 7,5$ s. L'effet sur la résonance à 11 s est moins évident.

La figure 21 peut nous aider à interpréter l'effet de l'allongement de la digue Nord-Est. On observe sur cette figure une canalisation de la houle vers la "passe" et le "bassin". Cette canalisation semble plutôt profitable au reste du port, où l'agitation est atténuée.

Par ailleurs, l'agitation dans le "bassin" et la "passe" est loin de devenir catastrophiques. Au contraire, l'absorption d'énergie par la digue est suffisante pour atténuer de façon significative une partie de l'effet de résonance. Le pic à $T = 7,5$ secondes disparaît ainsi sur toutes les courbes.

Le pic à $T = 11$ secondes est moins atténué. Il faut cependant remarquer que les houles dont la période dominante est de l'ordre de 11 secondes sont des houles de grande amplitude. Il serait sans doute plus réaliste, pour de telles périodes, de simuler un déferlement de la houle sur la nouvelle digue. L'absorption d'énergie se faisant sur une longueur plus grande, on observerait alors une forte diminution du coefficient d'amplification (voir la figure 12).

Remarquons enfin qu'il pourrait être intéressant de profiter de l'effet de canalisation pour casser la houle près du quai du laboratoire. La construction de la cale de halage à ce niveau nous semble par conséquent préférable (à condition que ce soit possible !).

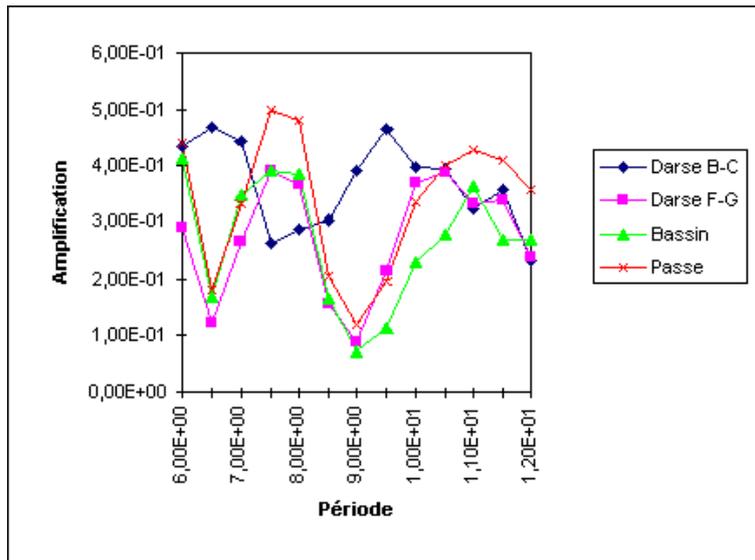


Figure 14: *Ajout de la cale de halage*

5 Conclusion

La réalisation d'une simulation numérique réaliste de la houle dans le port de Banyuls a permis de valider les solutions retenues pour diminuer l'agitation du plan d'eau. Les travaux préconisés consistent successivement en la réalisation d'une cale de halage sur le quai G, la construction d'une digue parallèle à la digue Nord-Est, et surtout l'allongement d'une cinquantaine de mètres de la digue Nord-Est.

Selon notre étude, les effets probables de ces travaux seront les suivants:

- Cale de halage: légère atténuation de la houle dans la darse F-G. Effet négligeable sur le reste du port.
- Digue parallèle à la digue Nord-Est: protection efficace des darses A-B, B-C, C-D. Effet négligeable sur le reste du port. En particulier, persistance des phénomènes de résonance.
- Prolongement de la digue Nord-Est: diminution du coefficient d'amplification dans tout le port, suppression du phénomène de résonance de période 7,5 secondes. Protection du port en cas de forte tempête par déferlement de la houle sur la digue.

References

- [1] LANDAU, LIFSCHITZ, *Physique Théorique, Mécanique des fluides*, tome 6, édition MIR, Moscou, 1989.

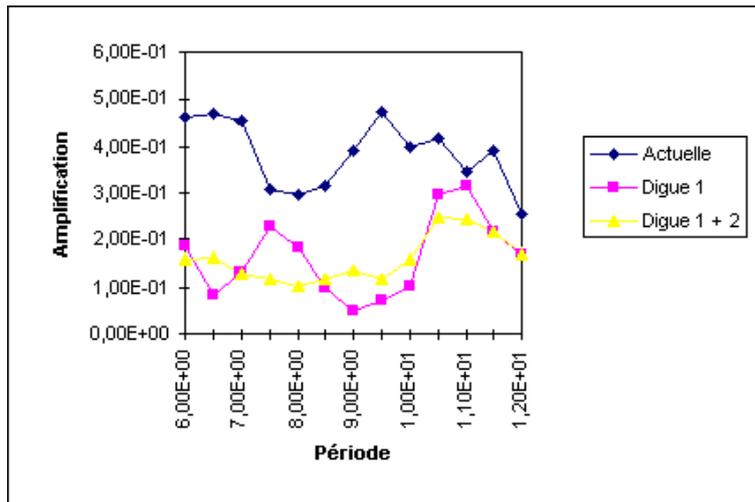


Figure 15: *Effet des digues sur le coefficient d'amplification dans la darse B-C*

- [2] LAJOIE D., BONNEFILLE R., *Mise en oeuvre d'un modèle réduit du port de TOGA (Corse). Comparaison des mesures de l'agitation du plan d'eau avec les résultats de simulations numériques en houles régulière et irrégulière.* Vième Journées Nationales Génie Cotier-Génie Civil, Toulon, 13-15 mai 1998.
- [3] SANCHEZ M., *Agitation portuaire: modélisation et mesure.* Vième Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Toulon, 13-15 mai 1998.
- [4] ISAACSON M., QU S., *Waves in a harbour with partially reflecting boundaries,* Coastal Engineering, 14 (1990), pp 193-214.
- [5] SEABRA SANTOS F.J., *Contribution à l'étude des ondes de gravité bidimensionnelles en eau peu profonde,* Thèse de physique de l'INP de Grenoble, juillet 1985.

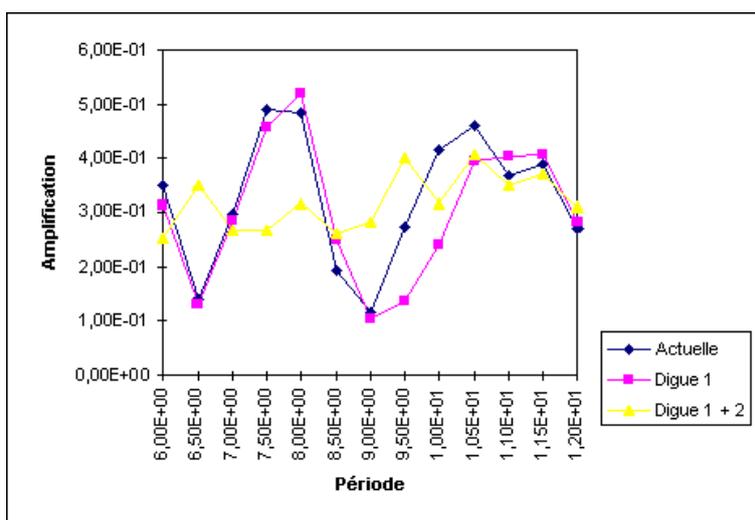


Figure 16: *Effet des digues sur le coefficient d'amplification dans la darse F-G*

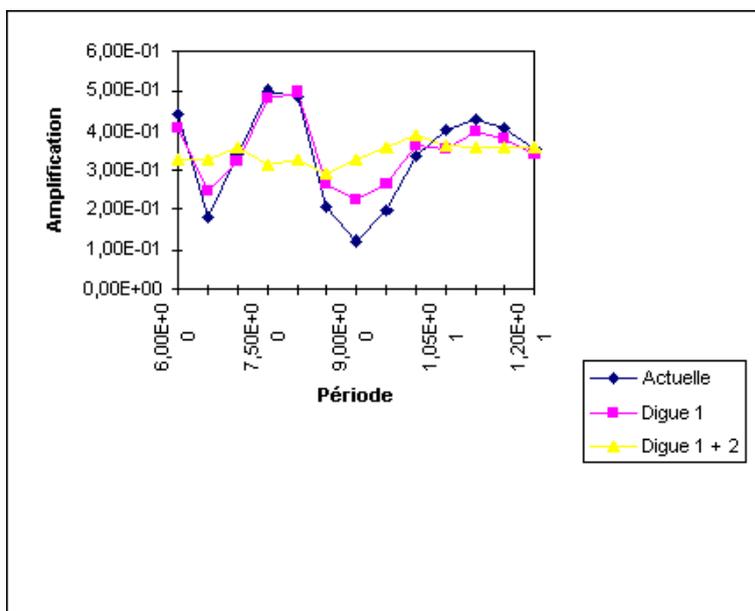


Figure 17: *Effet des digues sur le coefficient d'amplification dans la passe.*

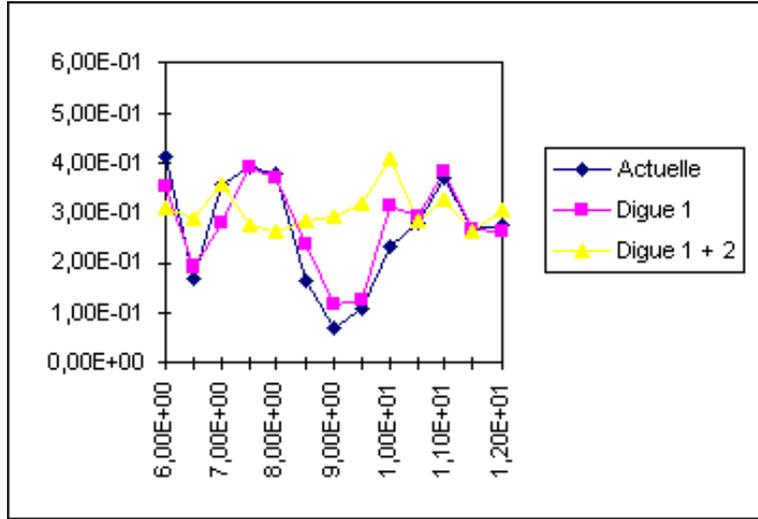


Figure 18: *Effet des digues sur le coefficient d'amplification dans le bassin*

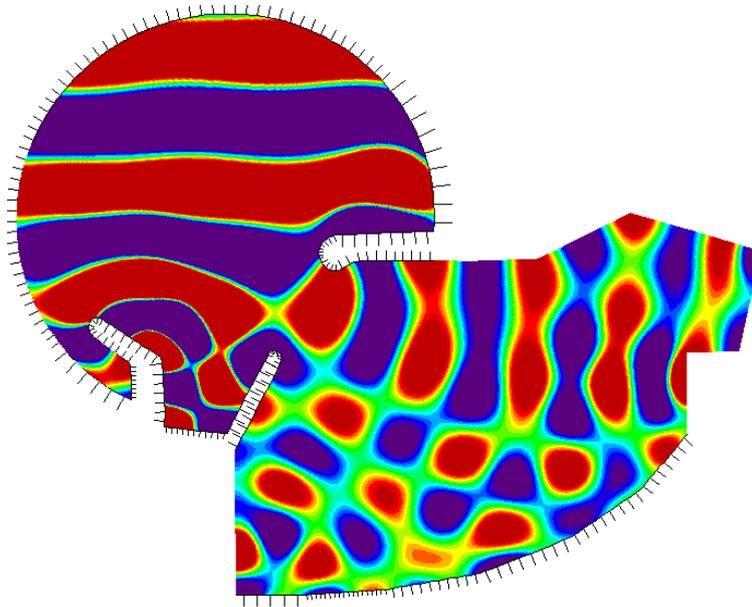


Figure 19: *Port actuel ($T = 7,5 s$)*

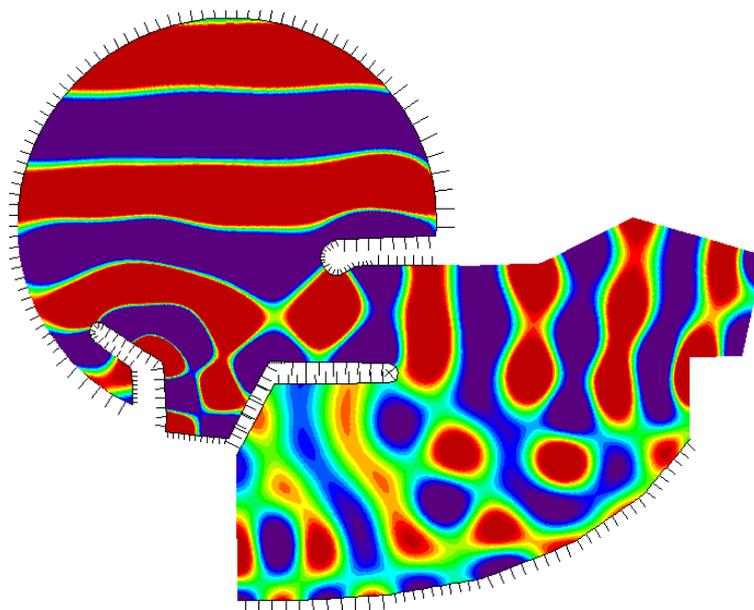


Figure 20: *Port modifié* ($T = 7,5 \text{ s}$)

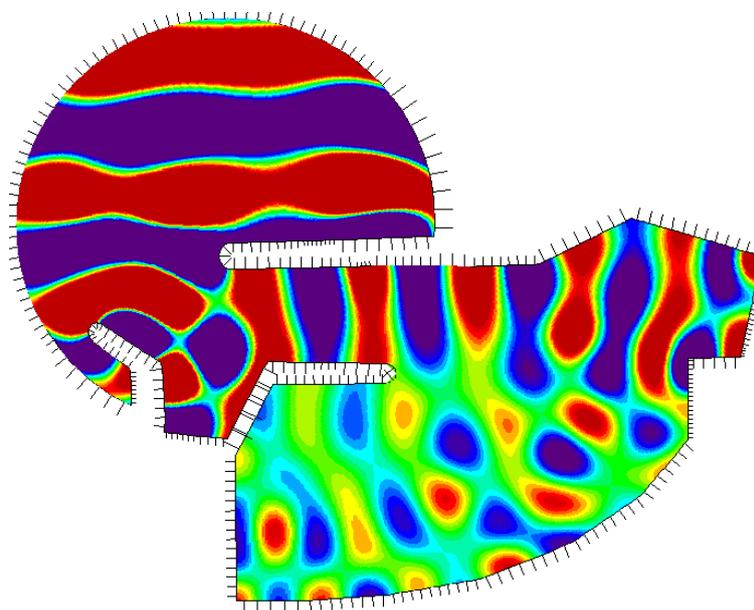


Figure 21: *Ajout de la deuxième digue* ($T = 7,5 \text{ s}$)